

Modelo geológico 3D de la estructura en sinforme de Monfragüe: un valor añadido al patrimonio geológico del Parque Nacional

P. Gumiel⁽¹⁾⁽²⁾, M. Arias⁽²⁾, V. Monteserín⁽¹⁾ y M. Segura⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003, Madrid
p.gumiel@igme.es, v.monteserin@igme.es

(2) Departamento de Geología, Universidad de Alcalá, (A-2, km 33,600), 28871 Alcalá de Henares, Madrid
pablo.gumiel@uah.es, monica.arias@alu.uah.es, manuel.segura@uah.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo geológico 3D de la estructura tectónica denominada “el sinforme de Monfragüe”. Se trata de un pliegue varisco, de magnitud kilométrica, de orientación general ONO-ESE y vergencia norte, que está constituido por rocas del Paleozoico (Ordovícico-Silúrico). Esta estructura con su litología condiciona la morfología y el relieve del Parque. El sinforme de Monfragüe se caracteriza por su asimetría, con un flanco sur muy verticalizado (flanco inverso) en el que se desarrollan grandes crestos que son los que constituyen los puntos emblemáticos del Parque (El Salto del Gitano). Por el contrario, el flanco norte de la estructura es normal y tiene un buzamiento que generalmente no sobrepasa los 40° hacia el sur. El modelo 3D de esta estructura se ha basado en el conocimiento geológico que se tiene de la misma, habiéndose utilizado un software específico de modelización geológica, GeoModeller® (www.geomodeller.com). En este programa, las unidades litológicas se describen mediante una “pila estratigráfica”, una característica esencial es que la determinación 3D del “espacio geológico” se realiza mediante algoritmos de campo potencial, en donde los límites geológicos (contactos) son superficies equipotenciales y los datos de orientación (buzamientos, foliaciones etc.) son gradientes de potencial. Finalmente, se resalta la idea de que un modelo geológico 3D de estas características, con su representación tridimensional, junto con secciones geológicas que clarifican la estructura, representa un valor añadido al conocimiento del patrimonio geológico del Parque Nacional y además es un interesante ejercicio académico que tiene un gran valor didáctico.

Palabras clave: Modelo geológico 3D, Monfragüe, Parque Nacional, Patrimonio Geológico, Sinforme

3D Geological modelling of the Monfragüe synform: a value added to the geologic heritage of the National Park

ABSTRACT

3D geological modelling of a tectonic structure called “the Monfragüe synform” has been carried out to obtain a better insight into the geometry of this folding structure. It is a kilometric variscan WNW-ESE trending fold verging towards north and made up by a Palaeozoic sequence (Ordovician-Silurian). This structure with its lithology make up the morphology and the relief of the Park. The Monfragüe synform is an asymmetrical folding structure showing southern limb dipping steeply to the south (reverse limb) what is well observed in the Armorican Quartzite at the “Salto del Gitano”. However, northern limb dips gently (less than 40°) to the south (normal limb). 3D geological modelling has been built on the basis of the geological knowledge and the structural interpretation, using 3D GeoModeller® (www.geomodeller.com). In this software, lithological units are described by a stratigraphic pile. A major original feature of this software is that the 3D description of the geological space is achieved through a potential field formulation in which geological boundaries are isopotential surfaces, and their dips are represented by gradients of the potential. Finally, it is emphasized the idea that a 3D geologic model of these characteristics, with its three-dimensional representation, together with suitable geological sections that clarify the structure in depth, represents a value added to the Geologic Heritage of the National Park and besides it supposes an interesting academic exercise which have a great didactic value.

Key words: 3D geological modelling, Geological Heritage, Monfragüe, National Park, Synform

Introducción

La realización de una cartografía geológica, como cualquier otro trabajo geológico, lleva consigo una interpretación tridimensional de la disposición y

estructura de las formaciones geológicas diferenciadas. El geólogo, cuando está realizando el trabajo de campo, de forma implícita, y a medida que obtiene datos, va realizando un proceso mental para imaginarse la estructura y la disposición de las formacio-

nes diferenciadas en el espacio y poder ser capaz de dibujarla en un mapa (2D). Igualmente, realiza una serie de cortes geológicos que le sirven de ayuda para resolver la estructura, introduciendo de esta forma la dimensión de profundidad (3D).

La observación tridimensional de una estructura geológica es un aspecto muy importante que el geólogo está acostumbrado a desarrollar como parte de su trabajo. Pero hoy día, y gracias a programas específicos muy potentes de modelización geológica, es posible generar de forma relativamente sencilla un modelo geológico 3D que sea una aproximación muy cercana a la realidad.

En este trabajo se ha generado por primera vez un modelo geológico 3D de una estructura bien conocida que es el denominado sinforme de Monfragüe, del que en la actualidad se posee un buen grado de conocimiento geológico. Esto es debido en parte a la realización de la cartografía geológica del IGME de las Hojas MAGNA a escala 1:50.000, números 623 (Martín Herrero *et al.*, 1987), 651 (Bascones Alvira y Martín Herrero, 1987) y 652 (Monteserín López y Pérez Rojas, 1987), el trabajo de Duque (1999) y a través de los estudios realizados por el Departamento de Geología de la Universidad de Alcalá en el Parque de Monfragüe desde hace una década. En este parque se organizan actividades que comprenden, desde visitas anuales con alumnos de la titulación de Ciencias Ambientales, hasta la realización de proyectos de investigación, entre los que destacan la elaboración de la Guía Geológica del Parque de Monfragüe (Gumiel *et al.*, 2003), financiada por la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Extremadura y la cartografía geomorfológica del Parque (Soto, 2006).

Finalmente, se resalta la idea de que un modelo geológico 3D de estas características representa un valor añadido para dar a conocer el Patrimonio Geológico de este Parque Nacional.

Marco geológico y estructural de la zona

El Parque Nacional de Monfragüe está situado en la Zona Centroibérica (ZCI, Fig. 1a) del Macizo Hespérico, concretamente, en el "Dominio de los Pliegues Verticales" (Díez Balda *et al.*, 1990). En líneas generales, esta zona se caracteriza por la existencia de grandes antiformes en los que normalmente afloran rocas precámbricas intruidas por rocas graníticas y por estrechos sinformes en donde afloran los materiales paleozoicos, como es el caso de Monfragüe (Fig. 1b).

De forma esquemática, desde un punto de vista

litoestratigráfico, los materiales que caracterizan la zona de Monfragüe se pueden agrupar en tres grandes conjuntos (Fig. 1b):

- **Materiales Preordovícicos** (Proterozoico superior-Cámbrico inferior). Constituyen el basamento en el área del Parque y su registro estratigráfico está formado por una potente serie turbidítica muy monótona, denominada "Alogrupo Domo Extremeño" (CEG, Figs.1b y 2a,b), de edad Rifeense superior-Vendiense, que está definida predominantemente por alternancias rítmicas de pizarras y grauvacas con ocasionales intercalaciones conglomeráticas. Por encima y de forma discordante se disponen los materiales del "Alogrupo Ibor" (Alcudiense superior-Cámbrico inferior), que forman un conjunto limolítico - pelítico con intercalaciones muy constantes, a escala regional, de areniscas, conglomerados, calizas y calcoesquistos, en el que las facies pelíticas son las dominantes. Para ampliar la descripción de los materiales y de la estratigrafía de la zona, se remite al lector a la Guía Geológica del Parque (Gumiel *et al.*, 2003).
- **Materiales Paleozoicos** (Ordovícico-Silúrico). Se disponen de forma discordante sobre los materiales preordovícicos y están representados por alternancias de cuarcitas y pizarras, con una pequeña participación volcánica hacia el techo de la serie (Silúrico) (Figs. 1b y 2a,b). Afloran a lo largo de todo el sinforme de Monfragüe, que en dirección NO-SE tiene una dimensión kilométrica.
- **Materiales de cobertera**. Corresponden a los depósitos terciarios y cuaternarios que se sitúan principalmente en la zona central del Parque conformando los rellenos entre los Ríos Tajo y Tiétar. También aparecen en pequeños retazos, irregularmente distribuidos en la cartografía geológica, que están asociados principalmente a depósitos de ladera y depósitos fluviales. Su litología está representada por arenas, gravas y arcillas, así como depósitos de cantos (Fig. 1b). Estos materiales no han sido considerados en el diseño del modelo 3D que aquí se presenta, para facilitar la visualización del mismo, ya que en este modelo lo que se resalta es la estructura tectónica de las rocas paleozoicas.

La configuración estructural de las rocas que forman el Parque de Monfragüe es el resultado de la superposición de varias "fases de deformación", de las cuales, las más importantes corresponden a la Orogenia Hercínica o Varisca. La Orogenia Varisca es la responsable de las principales estructuras de la zona, en concreto, la primera y principal fase de deformación (F_1) es la que genera los grandes pliegues, entre ellos el sinforme de Monfragüe. En algu-

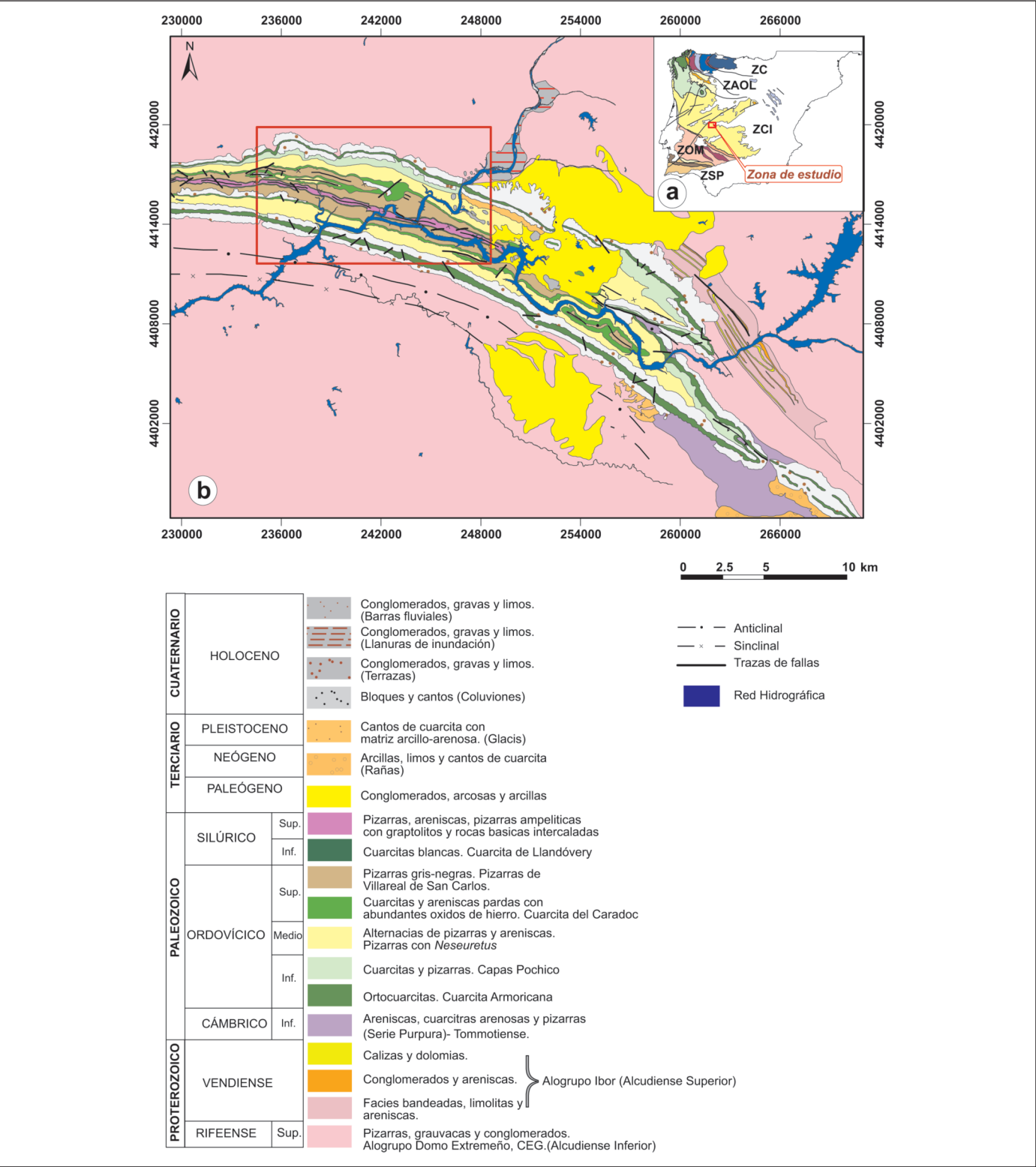


Figura 1. a) Situación del Parque Nacional de Monfragüe en la Zona Centroibérica (ZCI) del Macizo Hespérico. ZC: Zona Cantábrica. ZAOL: Zona Asturoccidental Leonesa. ZOM: Zona Ossa Morena. ZSP: Zona Surportuguesa. b) Estructura general del sinforme de Monfragüe con las tres grandes unidades litoestratigráficas que la caracterizan. El rectángulo en rojo es el área modelizada

Figure 1. a) Location of the Monfragüe National Park in the Central Iberian Zone (CIZ) of the Iberian Massif. CZ: Cantabrian Zone. WALZ: West Asturian-Leonese Zone. OMZ: Ossa Morena Zone. SPZ: South Portuguese Zone. b) General structure of the Monfragüe synform with the three lithological units which characterize the area. The rectangle in red is the modelled area

nos sectores próximos hay evidencias de cizallas extensionales que se originaron por el colapso posterior al engrosamiento cortical y que se atribuyen a la F_2 (Diez Balda *et al.*, 1992). Otras fases posteriores de deformación (F_3 y F_4) tienen mucha menor importancia en el área de este trabajo.

Hay, por otra parte, evidencias de otras deformaciones anteriores enmascaradas posteriormente, así como movimientos más tardíos atribuidos a la Orogenia Alpina, de menor importancia en la zona y casi siempre de carácter frágil distensivo. En la zona del Parque la deformación alpina s.l. está representada por fallas de orientación NE-SO, cuya representante principal es la falla de Plasencia, y otras de orientación NO-SE y N-S que dan lugar a zonas de cizalla y a fallas de extensión, que limitan las cuencas neógeno-cuaternarias de la región. Las deformaciones tardías tampoco se han tenido en cuenta en el diseño del modelo geológico 3D para resaltar la importancia de la estructura en sinforme del Parque.

El sinforme de Monfragüe es un pliegue varisco, de magnitud kilométrica y de orientación general ONO-ESE (Fig. 1b). La vergencia de la estructura es hacia el norte y el eje tiene una dirección de inmersión hacia el SE en la zona cartografiada. El sinforme está constituido por rocas del Paleozoico (Ordovícico-Silúrico) y esta estructura con su litología condiciona la morfología y el relieve característico del Parque. Los tres niveles cuarcíticos, que de muro a techo son la Cuarcita Armoricana, la Cuarcita del Caradoc y la Cuarcita del Llandóvery (Silúrico inferior), forman los tres resaltes morfológicos que constituyen el relieve del Parque (Fig. 2a, b) y han sido consideradas formaciones de referencia para obtener el modelo geológico 3D de la estructura.

El pliegue de Monfragüe se caracteriza por su asimetría, con un flanco sur muy verticalizado (flanco inverso) en el que se desarrollan grandes crestones (roquedos) que son los que constituyen los puntos emblemáticos del Parque, como el Salto del Gitano (Fig. 3a). Por el contrario, el flanco norte de la estructura es un flanco normal con menor buzamiento, generalmente no sobrepasa los 40° hacia el sur, y el relieve lo forman las cuarcitas que dan lugar a "cuestas en graderío" (por ejemplo, el Puerto de La Serrana, Fig. 3b).

Por otra parte, la primera fase varisca lleva asociada una esquistosidad de plano axial, desarrollada en condiciones de bajo grado metamórfico (esquistos verdes) y que sobre todo es observable en los materiales más pelíticos. Los criterios cinemáticos y de polaridad que proporcionan las relaciones geométricas entre los planos de estratificación (S_0) y los de esquistosidad (S_1) son determinantes y confirman

que el flanco sur de la estructura es flanco inverso (Fig. 3c) y el norte es flanco normal.

La edad de la deformación responsable de la estructura de Monfragüe es Varisca, y tuvo lugar a finales del Devónico superior y comienzos del Carbonífero. La fase principal de deformación dúctil se produjo en el Carbonífero Inferior (Westfaliense - 315Ma- según Martínez Poyatos *et al.*, 2001), como resultado de un acortamiento de orientación aproximada NE-SO. Esta fase (F_1) originó pliegues a todas las escalas y en todos los materiales. Se han aplicado funciones cónicas (para descripción del método véase por ejemplo, Bastida *et al.*, 1999; Aller *et al.*, 2004; Bastida *et al.*, 2004, 2005) para ajustar los pliegues observados en el sinforme de Monfragüe, ya que son una herramienta muy útil para una descripción cuantitativa y clasificación gráfica de las superficies plegadas. En general, los pliegues tienen geometría de tendencia sinusoidal y parabólica (Fig. 3d) como puede observarse por la situación de los puntos en el diagrama $h-\alpha$ (Fig. 4) de relación de aspecto (h) frente al área normalizada (α). Este diagrama se ha obtenido a partir del análisis geométrico de los pliegues encontrados, utilizando el programa FOLD PROFILER, con códigos de MATLAB® (Lisle *et al.*, 2006).

Desde un punto de vista geotectónico, la estructuración varisca puede obedecer a una tectónica de "mega-bloques corticales", en los que los sinformes quedan "pinzados" y posiblemente conectados con mega-cizallas profundas. Los abombamientos favorecieron el emplazamiento de los batolitos, principalmente en los antiformes, y el desarrollo de cabalgamientos de bajo ángulo en las rocas paleozoicas que rellenan los sinformes (Gumiel *et al.*, 2003). El desarrollo a veces de "estructuras en flor" puede ser debido a procesos transpresivos reconocidos en zonas próximas (e.g. sinforme de La Codosera, Sanderson *et al.*, 1991).

Metodología y fundamentos básicos del proceso de generación del modelo geológico 3D de Monfragüe: Método de interpolación de Campo Potencial

El modelo geológico 3D de esta estructura se ha basado en el conocimiento geológico que se tiene de la misma y se ha realizado utilizando un potente software específico de modelización geológica en 3D, GeoModeller® (www.geomodeller.com), desarrollado originalmente por el BRGM (Lajaunie *et al.*, 1997; Calcagno *et al.*, 2002) dentro del proyecto GeoFrance 3D.

La ventaja que este programa tiene con respecto a

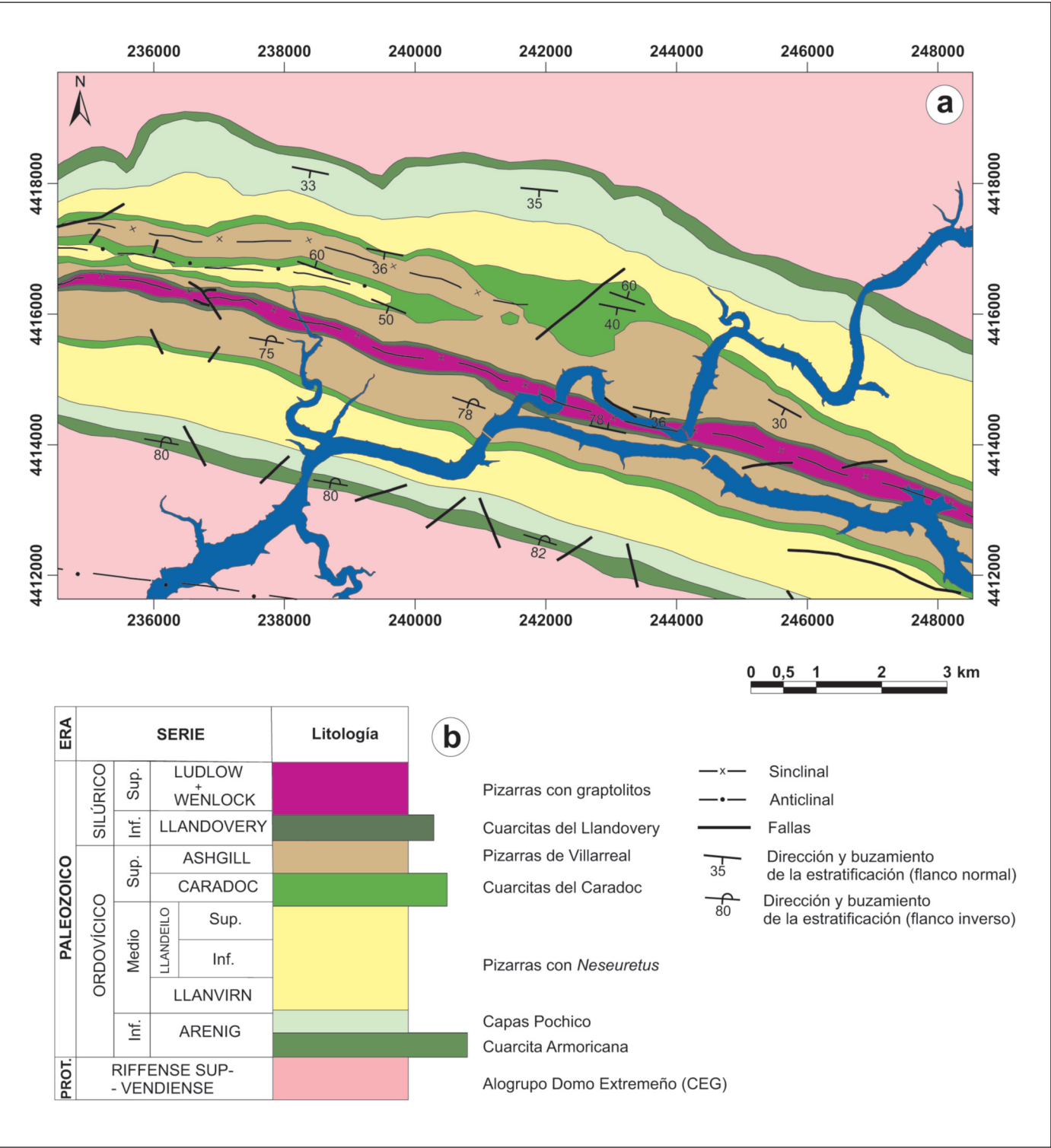


Figura 2. a) Cartografía geológica del sinforme de Monfragüe de la zona visitable del Parque Nacional, en el modelo geológico 3D que aquí se presenta. b) Serie estratigráfica generalizada de la zona en la que se resaltan los tres niveles cuarcíticos, que de muro a techo son la Cuarcita Armoricana, la Cuarcita del Caradoc y la del Silúrico Inferior (Llandovery) y que forman los relieves morfológicos de la estructura. Misma leyenda para las figuras 6 y 7

Figure 2. a) Geological mapping of the Monfragüe synform in the visiting zone of the National Park, in the presented 3D geological model. b) General stratigraphical sequence of the area in which are highlighted the quartzitic horizons that determine the topography and consequently the geomorphology of the Park. From bottom to top are the Armorican Quartzite, the Caradocian Quartzite and the Lower Silurian Quartzite. Same legend for figures 6 and 7

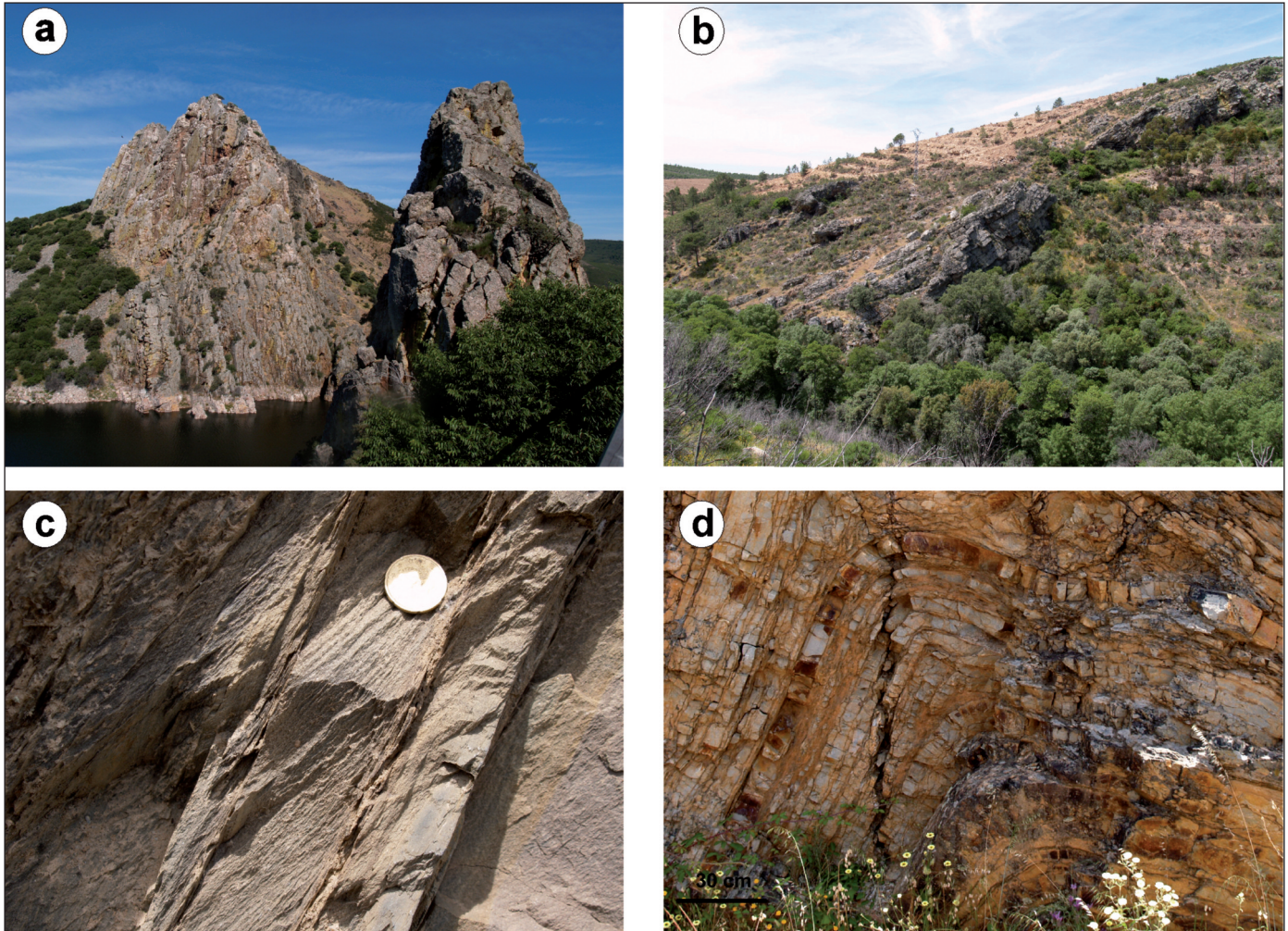


Figura 3. a) Crestón de Cuarcita Armórica (roquedo) que constituye uno de los puntos emblemáticos del Parque. “El Salto del Gitano”, es parte del flanco sur muy verticalizado (flanco inverso) del sinforme de Monfragüe. (Orientación de la foto S-N) b) “El Puerto de La Serrana” que forma parte del flanco norte de la estructura (flanco normal). Obsérvese el menor buzamiento de los estratos que generalmente no sobrepasa los 40° hacia el sur. (Orientación de la foto S-N). c) Relaciones entre planos de estratificación (S_0) y de esquistosidad (S_1) que proporcionan criterios cinemáticos y de polaridad. Obsérvese que el buzamiento de los planos S_1 es menor que el de los planos S_0 , confirmando que el flanco sur de la estructura de Monfragüe es inverso (Orientación de la foto SO-NE). d) Pliegue asimétrico de tendencia sinusoidal y con vergencia hacia el norte en las Cuarcitas del Caradoc. (Orientación de la foto N-S)

Figure 3. a) Crest of the Armorican Quartzite (roquedo) that makes up one of the most famous geological sites of the Park (the “Salto del Gitano”), which is in the steeply dipping and reverse southern limb of the Monfragüe synform. (Orientation of the photo S-N) b) “The Puerto de La Serrana” which is in the northern limb of the structure (normal limb). Notice how strata are dipping gently (lower than 40°) to the south. (Orientation of the photo S-N). c) Relationships between bedding (S_0) and cleavage (S_1) planes giving kinematic and polarity criteria. Notice as dipping of S_1 is lower than S_0 proving that the southern limb of the Monfragüe structure is reverse (Orientation of the photo SW-NE). d) Asymmetrical fold showing a tendency to sinusoidal and verging towards north in the Caradocian Quartzites. (Orientation of the photo N-S)

otro software de análogas características, es que para realizar un modelo geológico 3D de una determinada zona utiliza los datos que el geólogo obtiene sobre el terreno. La realización de un mapa geológico lleva implícita una interpretación, de forma que se interpolan líneas (en 2D) o superficies (en 3D) que representan los límites geológicos entre formaciones (contac-

tos). Son precisamente los límites geológicos, obtenidos a partir de las observaciones de cómo se disponen los materiales entre sí (concordantes, discordantes etc.), los primeros elementos que se van a utilizar como datos de entrada. Posteriormente, los segundos elementos que el geólogo tiene en cuenta son los datos de orientaciones espaciales (dirección y buza-

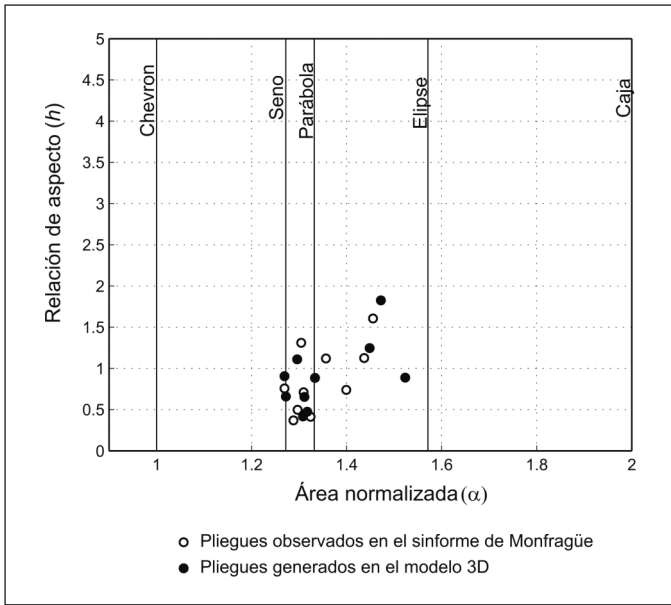


Figura 4. Diagrama de la relación de aspecto (h) frente al área normalizada (α) mostrando la localización de las principales formas de pliegues. El diagrama se ha obtenido al aplicar funciones cónicas para ajustar los pliegues observados en el sinforme de Monfragüe (puntos blancos) y su comparación con los generados en el modelo 3D (puntos negros), para explicación véase el texto *Figure 4. Diagram of aspect ratio (h) vs. normalized area (α) showing the location of main fold shapes. This diagram has been obtained applying conic functions to fit the natural folds of the Monfragüe synform (white dots) by comparison with the folding surfaces generated from the 3D model (black dots), see text for explanation*

miento de la estratificación, esquistosidad, foliaciones etc.) que le permiten determinar como se resuelve la estructura de los materiales en superficie y en profundidad. Éstos forman el segundo conjunto de datos de entrada.

En GeoModeller® las unidades litológicas forman una "pila estratigráfica" en la que se pueden establecer relaciones de concordancia y/o discordancia entre los materiales. Una característica esencial es que la determinación 3D del "espacio geológico" (Boissonnat 1988; Bertrand *et al.*, 1992) se realiza mediante un método de interpolación basado en algoritmos de campo potencial, en donde los límites geológicos (contactos) son superficies equipotenciales y los datos de orientaciones (dirección y buzamiento) son gradientes de potencial. El objetivo es conseguir que las relaciones geológicas y estructurales que se obtienen en el modelo se aproximen con el mayor rigor posible a la realidad.

Las superficies geológicas, representadas por un conjunto de curvas suavizadas en el espacio tridi-

mensional, son análogas a un conjunto de superficies equipotenciales de un campo escalar (potencial). Una solución única para la geometría 3D de las formaciones geológicas (interfaces) se obtiene asumiendo que los contactos para cada formación pertenecen a una misma superficie equipotencial y que los vectores de orientación son ortogonales a planos tangentes a los campos equipotenciales y representan gradientes de potencial o derivadas del campo. El campo equipotencial es interpolado por "cokriging" de incrementos y sus funciones derivadas (Lajaunie *et al.*, 1997). Los contactos geológicos se representan como líneas, o superficies equipotenciales interpoladas (iso-líneas en 2D e iso-superficies en 3D, Fig. 5a).

Las ventajas de utilizar "cokriging" es que se trata de un método de interpolación lineal que tiene poco sesgo y proporciona una estimación de errores como método geoestadístico. En un contexto geológico los errores pueden considerarse como "ruido" y dependen de la escala de trabajo.

A continuación y de forma esquemática, se presentan las bases del método de interpolación de campo potencial y "cokriging" de potenciales (Chilès *et al.*, 2004). Este método de interpolación es ideal para el caso de secuencias estratigráficas bien estratificadas, como es el caso de la estructura de Monfragüe, en el que cada serie de superficies equipotenciales puede ser derivada. La ventaja de este método es que los datos de cada unidad pueden influir en la forma de las unidades vecinas y viceversa. Todas las medidas de direcciones y buzamientos se tienen en cuenta en el punto de medida y ejercen un peso en la orientación general de las superficies equipotenciales cercanas. Además, con este método se asegura un curvado y suavizado de los límites de las superficies equipotenciales que proporciona una aproximación realista de las superficies geológicas. Por otra parte, con la formulación de campos potenciales se evitan los cruces entre líneas, y, por tanto, entre superficies estratigráficas, lo que no sería admisible en la realidad. Finalmente, tanto física como matemáticamente, los campos potenciales son bien conocidos.

La forma matemática de un campo potencial es una función implícita que puede expresarse como $f(x, y, z) = 0$. La función potencial permite conocer qué formación está presente en cualquier punto arbitrario p del espacio en 3D. Esto se consigue simplemente calculando el valor del potencial en el punto p y comparándolo con los valores equipotenciales utilizados para modelizar cada formación geológica (Fig. 5b).

Sean $v_1, v_2, \dots, v_n$ incrementos de valores de potencial que corresponden a las diferentes superficies equipotenciales de las n formaciones geológicas en una

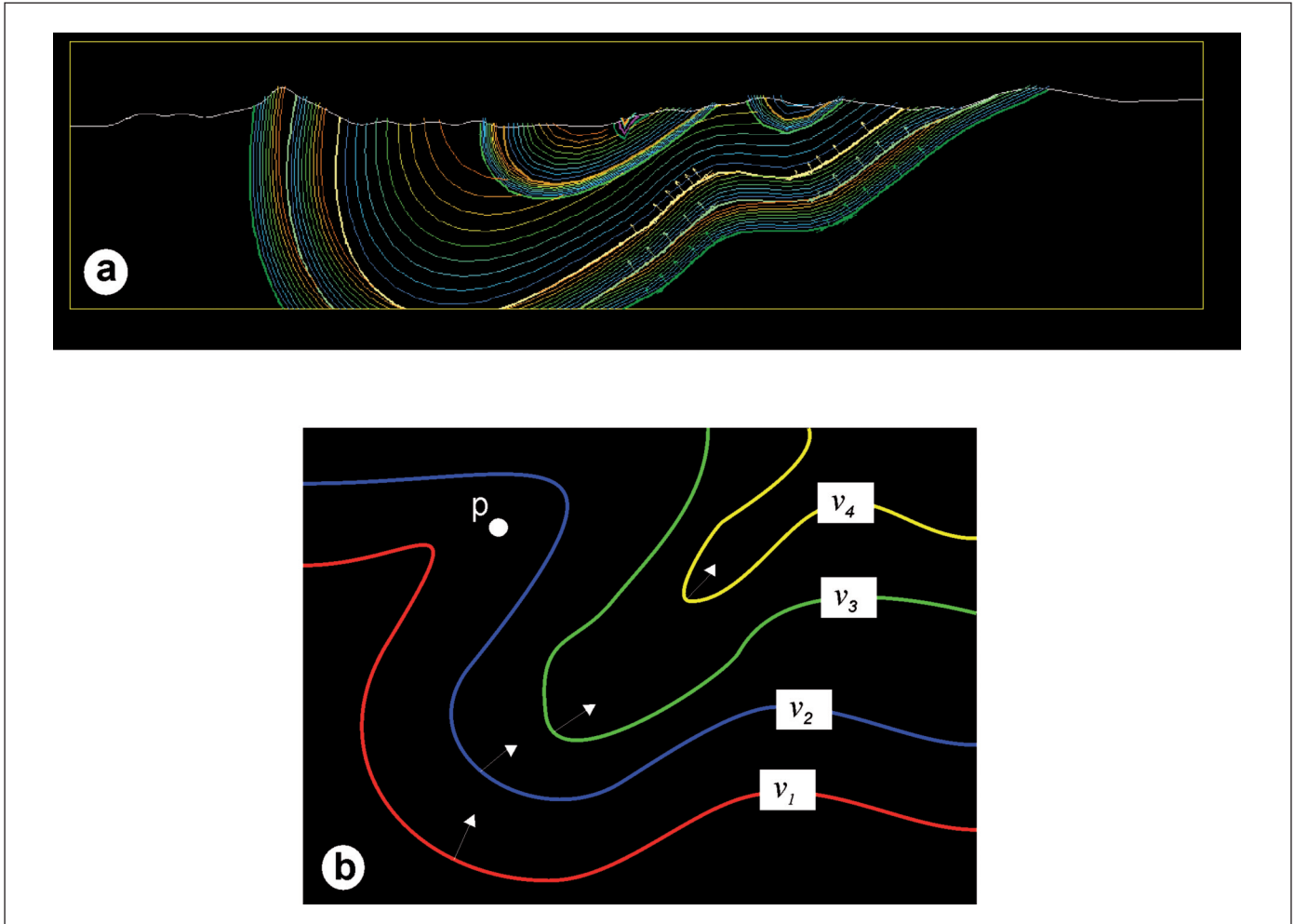


Figura 5. a) Generación del modelo geológico 3D de la estructura de Monfragüe. Los contactos geológicos están representados como líneas (2D) o superficies equipotenciales (3D) interpoladas por el método de campo potencial y "cokriging". b) Determinación de la formación geológica a la que pertenece un punto p utilizando el método de interpolación de campo potencial, (para explicación véase el texto)

Figure 5. a) 3D geological modelling of the Monfragüe structure. Geological contact data for each interface lie on a potential field surface (an iso-potential) interpolated by the potential field method and cokriging. b) Determination of the geological formation to which the point p belongs by using the interpolated potential field, (for explanation see text)

serie, siendo los "techos" de las formaciones geológicas $f_1, \dots, f_n$ y asumiendo también que hay una formación de cobertera f_{n+1} . Supongamos que $V(p)$ es el valor de potencial en un punto p , comparando este valor con los valores equipotenciales utilizados para modelizar cada formación geológica individual, se conoce la geología en p . En este caso $v_1 < V(p) < v_2$, por consiguiente, p debe estar en la formación f_2 (la equipotencial v_2 representa el techo de la formación f_2).

Generalizando,

- si $V(p) < v_1 \Rightarrow p \in$ a la formación f_1
- si $V(p) < v_2 \Rightarrow p \in$ a la formación f_2 , entonces
- si $V(p) < v_{i+1} \Rightarrow p \in$ a la formación f_{i+1}

- si $v_i < V(p) < v_{i+1} \Rightarrow p \in$ a la formación f_{i+1} , y
- si $V(p) > v_n \Rightarrow p \in$ a la formación f_{n+1} porque $V_p < V_n$.

El modelo geológico 3D del sinforme de Monfragüe

El modelo geológico 3D del sinforme de Monfragüe se ha realizado sobre un área de unos 14 km de largo en dirección E-O, por 8 km de ancho en dirección N-S, que coincide aproximadamente con la zona visitable del Parque.

En el diseño del modelo 3D se han tenido en cuenta, tanto las relaciones estratigráficas entre las distin-

tas formaciones geológicas, como su disposición estructural en el espacio tridimensional. Las formaciones geológicas que han intervenido en la generación del modelo se enumeran a continuación. El "Alogrupo Domo Extremeño" (CEG) constituye el basamento de la estructura. Sobre el alogrupo y discordante ("erode" en GeoModeller®) se ha considerado la Cuarcita Armoricana que constituye el muro del sinforme. El resto de unidades que forman la secuencia paleozoica que constituye el sinforme son las Capas Pochico, Pizarras con *Neseuretus*, Cuarcitas del Caradoc, Pizarras de Villarreal, Cuarcitas del Llandóvery (Silúrico inferior) y las Pizarras con grap-

tolitos (Fig. 2a, b). Todas estas formaciones se han considerado concordantes entre sí ("onlap" en GeoModeller®). Las formaciones superiores (materiales de la cobertera), así como las fallas que producen pequeños desplazamientos en la estructura, se han omitido para facilitar la visualización del modelo 3D que se ha centrado en el sinforme y en las rocas paleozoicas que lo forman.

Los cortes o secciones geológicas son una herramienta fundamental en Geología ya que aportan una valiosa información sobre la evolución de las estructuras en profundidad. Para su construcción se utiliza la información obtenida sobre el terreno (e.j. direc-

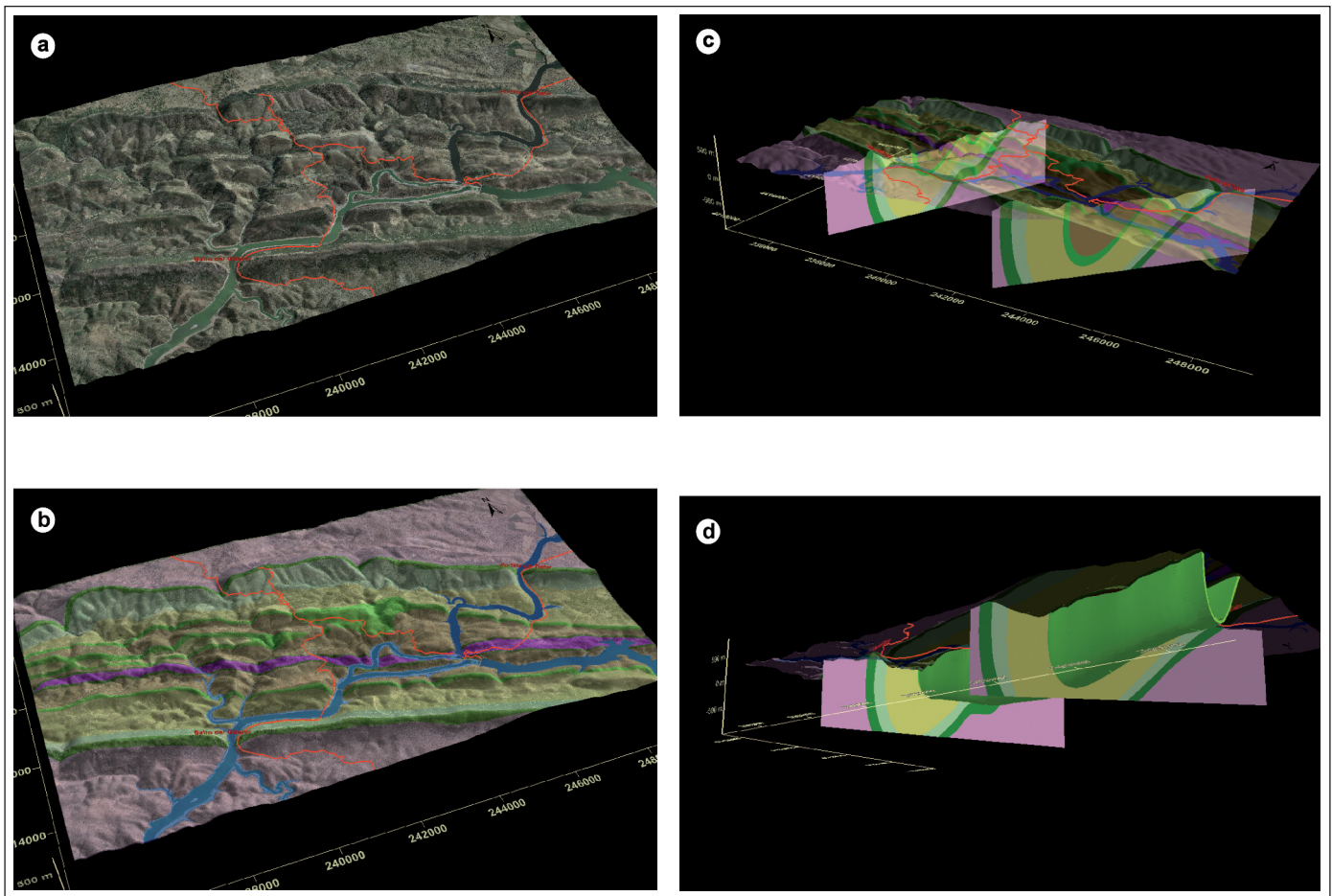


Figura 6. Diferentes aspectos del modelo geológico 3D del sinforme de Monfragüe en un SIG. a) perspectiva 3D del mosaico generado con las ortoimágenes de la zona. b) perspectiva 3D del raster de la geología en la zona visitable del Parque, que ha sido modelizada superpuesta a la ortoimágen. c) secciones geológicas en 3D (El Salto del Gitano y La Portilla del Tietar) que ilustran la evolución de la estructura en profundidad. La geología tiene una transparencia de un 60% para facilitar la observación de los cortes. d) secciones geológicas 3D y el sinclinal delimitado por las Cuarcitas del Caradoc (vista desde el fondo por el SE)

Figure 6. Different aspects of the 3D geological model of the Monfragüe synform in a GIS. a) 3D perspective of the mosaic generated using the orthoimages of the area. b) 3D perspective of the geology of the visiting area of the Park which has been modelled over the orthoimages. c) 3D geological sections (The Salto del Gitano and La Portilla del Tietar) showing the evolution of the structure in depth. The geology has a 60% of transparency to facilitate the observation of the sections. d) 3D geological sections and the syncline delimited by the Caradocian Quartzites (view from bottom SE)

ción y buzamiento de la estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas etc.), así como técnicas de levantamiento basadas en geometría descriptiva, principalmente en el sistema de planos acotados. En la elaboración del Modelo 3D del sinforme de Monfragüe se han realizado varios cortes geológicos seriados sobre el terreno, de orientación aproximada NE-SO ortogonal a la estructura, con objeto de comprender la evolución de la misma en profundidad. Estos cortes geológicos han sido modelizados en 3D con GeoModeller® para ajustar la cartografía geológica y las secciones con el mayor rigor posible. El modelo geológico 3D generado con GeoModeller® ha sido integrado en un SIG para tratar de forma conjunta las diferentes capas (layers) de información.

En primer lugar, se ha generado un mosaico con las ortoimágenes de la zona modelizada, con un tamaño de celda de 2x2 m (Fig. 6a), en el que se observa claramente la expresión morfológica del relieve tan característico (tipo apalachiano), con sierras alineadas y curvadas de orientación general NO-SE. Se diferencian con gran nitidez las tres barras de cuarcitas que condicionan el relieve de la estructura y consiguientemente el paisaje. La Cuarcita Armoricana constituye la barra de mayor cota (500 m de media), la Cuarcita del Caradoc forma la de cota intermedia (400 m de media) y la del Llandovery forma el crestón de menor altura (300 m de media). La erosión diferencial por contraste de competencia de estas barras cuarcíticas con los materiales más pelíticos, que conforman los valles en los que se encaja el sistema fluvial, se pone claramente de manifiesto en la panorámica de la Figura 6a.

En segundo lugar, se ha generado una imagen "raster" con la geología de la zona modelizada, con el mismo tamaño de celda (2x2m) para que no existiera ningún problema de acoplamiento entre las distintas capas. Se puede observar una perfecta correlación entre la geología del sinforme, el Modelo Digital del Terreno (MDT) y el relieve claramente visible en las ortoimágenes que cubren la zona (Fig. 6b).

La consistencia del modelo 3D se empieza a comprobar cuando se representan las secciones modelizadas que muestran un acoplamiento perfecto de las formaciones geológicas entre las diferentes capas: ortoimágenes, geología y cortes geológicos (Fig. 6c). Los cortes geológicos muestran claramente el tipo de pliegue asimétrico obtenido en el modelo 3D, que se corresponde de forma objetiva con la realidad. Se ha generado, de forma realista, un sinforme con un flanco sur verticalizado (flanco inverso) y un flanco norte (normal) con suaves buzamientos hacia el sur (Fig. 6d)

El modelo geológico 3D (modelo sólido) es consis-

tente con las observaciones de campo y es una aproximación realista de la estructura geológica en sinforme (Fig. 7a). Una forma de validar el modelo geométrico ha sido aplicar funciones cónicas a los pliegues generados en el mismo y constatar que reflejan la geometría de los pliegues reales (Fig. 7b). Las estructuras plegadas obtenidas en el modelo 3D son también de tendencia sinusoidal y parabólica y se proyectan en los mismos campos y muy próximos a los pliegues reales que se muestran en el diagrama h- α (Fig. 4).

Los pliegues generados en el modelo se observan con gran nitidez en las barras cuarcíticas (Figuras 7a, a 7f). La formación de la zona de charnela en el sinclinal interno, definido por la Cuarcita del Silúrico (Llandovery), no se produce muy lejos de la superficie, como puede deducirse en el terreno a partir de la geometría de la cuarcita en las proximidades de la presa del Río Tietar. Sin embargo, la zona de charnela en el sinclinal definido por la Cuarcita del Caradoc se genera a unos 500 m de profundidad (Fig. 7b), lo que es consistente con la geometría de los pliegues. Igualmente, hay que destacar la generación de una zona anticlinal a nivel de las Cuarcitas del Caradoc (Fig. 7c), cuya existencia ha sido comprobada en el terreno y que conforma la estructura interna del sinforme.

La geometría de los pliegues en el modelo generado es muy realista y muestra las irregularidades de la zona de charnela con curvaturas y flexiones originadas probablemente por las fases de deformación posteriores que afectan al sinforme y producen interferencias en el pliegue principal (Fig. 7d).

La generación de la zona de charnela de la Cuarcita Armoricana se produce a mayor profundidad, no cerrando por el extremo SE de la zona (Fig. 7e), pero sí por el extremo NO de la misma, a más de 500 m de profundidad (Fig. 7f), debido a la inmersión del pliegue hacia el SE. El modelo geológico 3D también refleja claramente la diferencia en la geometría de ambos flancos del pliegue, con el flanco norte buzando suavemente hacia el sur y por el contrario el flanco sur (inverso) muy vertical (Fig. 7f).

Aplicaciones didácticas del Modelo 3D: Un valor añadido al patrimonio geológico del Parque Nacional

El caso del sinforme de Monfragüe es una estructura geológica relativamente sencilla ya que no tiene grandes complicaciones tectónicas, los afloramientos existentes son suficientemente extensos y las formaciones geológicas se conservan en ambos lados del

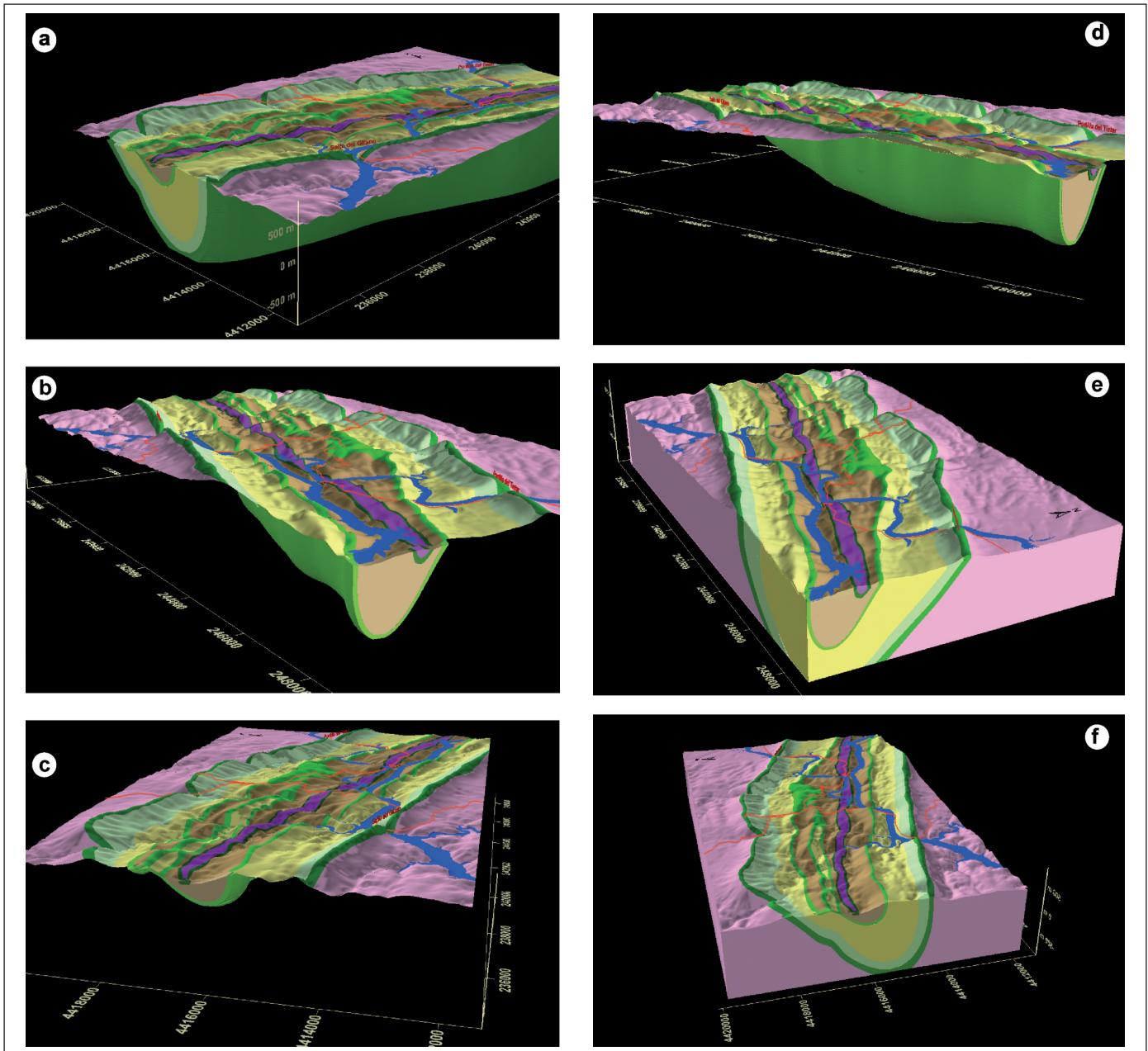


Figura 7. Diferentes perspectivas del modelo geológico 3D del sinforme de Monfragüe. a) perspectiva 3D de la estructura en la que se resalta la profundidad (-500m) a la que se ha generado la zona de charnela de la Cuarcita del Caradoc en el modelo (vista desde el SO). b) perspectiva 3D de los sinclinales definidos por la Cuarcita del Caradoc, las Pizarras de Villarreal y las cuarcitas y pizarras del Silúrico del núcleo del sinforme de Monfragüe (vista desde el SE). c) Sinclinal y anticlinal con vergencia norte marcado por las Cuarcitas del Caradoc (vista desde el Oeste). d) Panorámica longitudinal (NO-SE) del sinclinal delimitado por las Cuarcitas del Caradoc. Obsérvese el aspecto realista de la zona de charnela del pliegue. e) Perspectiva desde el SE del modelo geológico 3D del sinforme de Monfragüe, perfectamente delimitado por la Cuarcita Armoricana. f) Perspectiva 3D desde el Oeste. Obsérvese la asimetría del pliegue con el flanco sur verticalizado y el norte con suaves buzamientos hacia el Sur. La zona de charnela observable en la Cuarcita Armoricana en esta perspectiva es debida a la inmersión del eje del pliegue hacia el SE

Figure 7. Different perspectives of the 3D geological model of the Monfragüe synform. a) 3D perspective of the structure standing out the depth (-500m) to which the hinge zone of the Caradocian Quartzite has been generated in the model (view from SW). b) 3D perspective of the Caradocian Quartzites and the Villarreal Slates synclines, and the Silurian quartzites and slates of the core of the Monfragüe synform (view from SE). c) Syncline and anticline verging towards north marked by the Caradocian Quartzites (view from West). d) Longitudinal panoramic view (NW-SE) of the syncline delimited by the Caradocian Quartzites. Notice the realistic aspect of the hinge zone of the fold. e) 3D perspective from SE of the geological model of the Monfragüe synform, well delimited by the Armorican Quartzite. f) 3D perspective from the West. Notice the asymmetry of the fold with the steeply dipping and reverse southern limb and the northern (normal) limb gently dipping towards south. The hinge zone in the Armorican Quartzite observed in this view is because of the axis plunge towards SE

pliegue (sinforme). Pero además, es una estructura emblemática ya que el Parque de Monfragüe está situado sobre la misma.

Desde el reconocimiento de Monfragüe como Parque Nacional, el número de visitantes cada día es más numeroso. Se ha podido constatar que el visitante de Monfragüe, además de estar interesado en los valores característicos del Parque, como son la observación de la fauna, flora, los aspectos ambientales, senderismo y turismo en general, cada vez muestra mayor interés por comprender el significado de las rocas que conforman el Parque. Esto es debido en parte, a la mayor cercanía de la Geología a la sociedad, de aquí que la geología del Parque se considere como parte del patrimonio del mismo.

En este sentido, un modelo geológico 3D de la estructura de Monfragüe como el que aquí se presenta, con una clara representación tridimensional, junto con secciones geológicas que ayudan a comprender como se resuelve esta estructura en profundidad, tiene un gran valor didáctico. Con este modelo se facilita la comprensión del significado del subsuelo del Parque, se resalta la interacción entre el medio físico y el biótico y en definitiva, representa un valor añadido para dar a conocer el patrimonio geológico de este Parque Nacional.

Conclusiones

El modelo geológico 3D del sinforme de Monfragüe es una aproximación realista de la estructura tectónica que caracteriza esta zona y completa el conocimiento geológico que se tiene del Parque Nacional. Las relaciones geológicas y estructurales que se han obtenido en el modelo se aproximan con el mayor rigor posible a la realidad.

El modelo se ha generado con datos basados en el conocimiento real de la estructura y en la disposición espacial de las principales formaciones geológicas, que de muro a techo son la Cuarcita Armoricana, la Cuarcita del Caradoc y la del Silúrico Inferior. Éstas forman los tres resaltes morfológicos que configuran el relieve del Parque y han sido niveles de referencia para obtener el modelo geológico 3D de la estructura.

El modelo ha sido validado mediante un análisis geométrico de las superficies plegadas generadas en las distintas formaciones geológicas. Este análisis se ha realizado aplicando funciones cónicas a los pliegues obtenidos en el modelo y se constata que éstos reflejan la geometría de los pliegues reales, siendo en ambos casos de tendencia sinusoidal y parabólica.

El modelo geológico 3D se presenta mediante una serie de capas superpuestas (ortoimágenes, geología

y cortes geológicos) en un SIG. Se ha conseguido simular un pliegue asimétrico que se corresponde de forma objetiva con la realidad. Se ha generado un sinforme con un flanco sur verticalizado (flanco inverso) y un flanco norte (normal) con suaves buzamientos hacia el sur, en concordancia con lo que se infiere a partir de la geología de superficie.

Por último, el modelo 3D del sinforme de Monfragüe es una clara representación tridimensional de la geología, que junto con las secciones geológicas, ayudan a comprender como se resuelve esta estructura en profundidad. Esto sin duda representa un valor añadido al Patrimonio Geológico del Parque Nacional y tiene un gran valor didáctico.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del Proyecto: CGL2008-03046/BTE, la adquisición, mediante "leasing" anual del Programa GeoModeller®. Igualmente se agradece a Fernando Bastida, profesor de la Universidad de Oviedo, a un revisor anónimo y a A. Díez-Herrero (editor principal del B.G.M.), las sugerencias que han contribuido a la mejora del manuscrito.

Referencias

- Aller, J., Bastida, F., Toimil, N.C., Bobillo-Ares NC. 2004. The use of conic sections for the geometrical analysis of folded surfaces profiles. *Tectonophysics*, 379, 239–254.
- Bascones Alvira, L., Martín Herrero, D. 1987. Mapa geológico de España a escala 1:50.000 (MAGNA), Hoja 651: Serradilla. IGME.
- Bastida, F., Aller, J., Bobillo-Ares, N. 1999. Geometrical analysis of folded surfaces using simple functions. *Journal of Structural Geology*, 21, 729–742.
- Bastida, F., Aller, J., Toimil, N.C., Bobillo-Ares, N.C. 2004. La cinemática del plegamiento: algunas claves geométricas para su interpretación. *Trabajos de Geología, Univ. de Oviedo*, 24, 9–41.
- Bastida, F., Aller, J., Bobillo-Ares, N.C., Toimil, N.C. 2005. Fold geometry : a basis for their kinematical analysis. *Earth-Science Reviews*, 70, 129–164.
- Bertrand, P., Dufour, J.F., Francon, J., Lienhardt, P. 1992. Modélisation volumique à base topologique. *Actes MICAD92*, Paris, 1, 59–74.
- Boissonnat, J.D. 1988. Shape reconstruction from planar crosssections. *CVGIP. Graphical Models and Image Processing*, 44, 1–29.
- Calcagno, P., Martelet, G., Gumiaux, C. 2002. Apport de la modélisation géométrique 3D à l'interprétation géologique du complexe de Champtoceaux (massif armoricain). *19e'me RST*, Nantes, p. 79.
- Chilès, J.P., Aug, C., Guillen, A., Lees, T. 2004. Modelling

- the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data: The Potential-Field Method: *Workshop Proceedings: Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, Perth,WA.
- Díez Balda, M. A., Vegas, R., González-Lodeiro, F. 1990. Structure of the Central Iberian Zone. En: Dallmeyer y Martínez García (eds), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, 172-188.
- Díez Balda, M.A., Ayarza Arribas, P., Martínez Catalán, J.R. 1992. El cizallamiento dúctil suhorizontal de la segunda fase hercínica al sur de Salamanca: Engrosamiento y colapso extensional. *III Congreso Geológico Nacional*, vol. Symposium, Salamanca.
- Duque Macías, J. 1999. Un paseo por la geología del sinclinal de Monfragüe (Cáceres). *Meridies*, 3, 31-48.
- Gumiel, P., Campos, R., Segura, M., Monteserín V. 2003. *Guía Geológica del Parque Natural de Monfragüe*. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente, Dirección General de Medio Ambiente, Junta de Extremadura. 94 p.
- Lajaunie, C., Courrioux, G., Manuel, L. 1997. Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, 29, 571– 584.
- Lisle, R.J., Fernández Martínez, J.L., Bobillo-Ares. N., Menéndez, O., Aller, J., Bastida, F. 2006. FOLD PROFILER: A MATLAB®- based program for fold shape classification. *Computers and Geosciences*, 32, 102-108.
- Martín Herrero, D., Bascones Alvira, L., Ugidos Meana, J. M. 1987. Mapa geológico de España a escala 1:50.000 (MAGNA), Hoja 623: Malpartida de Plasencia. IGME.
- Martínez Poyatos, D., González Lodeiro, F., Azor, A., Simancas, J.F. 2001. La estructura de la Zona Centroibérica en la región de los Pedroches (Macizo Ibérico Meridional). *Rev. Soc. Geol. España*, 14 (1-2), 147-160.
- Monteserín López, V., Pérez Rojas, A. 1987. Mapa geológico de España a escala 1:50.000 (MAGNA), Hoja 652: Jaraicejo. IGME.
- Sanderson, D.J., Roberts, S., McGowan, J.A., Gumiel, P. 1991. Hercynian transpresional tectonics at the Southern margin of the Central Iberian Zone, West Spain. *Journal of the Geological Society, London*, 148, 893-898.
- Soto, S. 2006. *Cartografía geomorfológica del Parque Natural de Monfragüe (Cáceres)*. Escuela de Arquitectura y Geodesia, Trabajo Fin de Carrera. Informe inédito, 83 p. Universidad de Alcalá.

Recibido: julio 2009

Revisado: julio 2009

Aceptado: agosto 2009

Publicado: enero 2010

